



Minéralogie

La forêt des cristaux géants

Giovanni Badino et Paolo Forti



Dans une mine du Nord du Mexique, une série de grottes abrite les plus grands cristaux de gypse du monde.

Leur étude est en cours, avant qu'ils ne disparaissent à jamais...

Dans le désert de Chihuahua, au Nord du Mexique, le village de Naica s'est développé autour de l'une des plus grandes mines d'argent au monde. En 1910, cette mine est devenue célèbre, car les travaux d'excavation ont mis au jour, 130 mètres sous le niveau de l'entrée de la mine (située à 1385 mètres d'altitude) la « Grottes des épées » (*Cueva de las Espadas*), une cavité qui renfermait des cristaux de gypse atteignant deux mètres de hauteur, parmi les plus grands jamais découverts (les plus grands étant alors ceux de Mazan, dans le Vaucluse, atteignant 2,50 mètres). Cette grotte a malheureusement été presque entièrement pillée et ses cristaux sont aujourd'hui exposés dans les plus grands musées minéralogiques du monde.

Après la Seconde Guerre mondiale, l'activité minière s'est intensifiée et a atteint l'aquifère thermal sous-jacent, à 130 mètres de profondeur. Pour permettre aux mineurs de travailler, d'énormes pompes ont été installées. À l'heure actuelle, les pompes évacuent toujours du fond de la mine plus d'un mètre cube par seconde d'eau à 54 °C, et le niveau de l'aquifère a baissé de 700 mètres environ.

En 2000, à 290 mètres de profondeur, on découvrit trois autres grottes, ressemblant à d'énormes géodes, qui abritent des cristaux de gypse incroyables. Dans la plus grande d'entre elles, nommée Grotte aux cristaux (*Cueva de los cristales*), se trouve une forêt de cristaux aux dimensions gigantesques : la plupart d'entre eux mesurent quatre à six mètres, et le plus grand cristal atteint 11 mètres ! Les autorités condamnèrent immédiatement les grottes avec des grilles pour empêcher tout pillage.

Entre 2001 et 2005, des visites ponctuelles furent organisées, mais il apparut rapidement qu'il était

impossible d'explorer et d'étudier efficacement les grottes de Naica de cette façon, en raison des conditions environnementales extrêmes. La température, notamment dans la Grotte aux cristaux, y atteint 46 °C. En effet, si la température augmente toujours avec la profondeur, les grottes de Naica se situent dans une ancienne zone volcanique, de sorte que la température augmente plus vite qu'ail-

leurs avec la profondeur. De surcroît, l'humidité relative y est proche de 100 pour cent. Dans ces conditions, le corps ne peut refroidir par évaporation de la sueur. La peau se réchauffe jusqu'à la brûlure. En outre, après à peine cinq minutes, inspirer l'air brûlant et humide devient un calvaire, et les poumons sont rapidement saturés en eau, tandis que le cœur travaille plus fort.

On peut quantifier l'hostilité de cet environnement par l'indice humidex, qui tient compte de la température et de l'humidité. Le corps humain souffre lorsque cet indice dépasse 35, et au-delà de 55, le danger est réel. Les grottes de Naica ont des index humidex compris entre 95 et 105. Elles sont donc très dangereuses ! *A posteriori*, maintenant que nous en savons plus sur ce milieu, nous sommes heureux d'en être sortis vivants à chaque fois !

En 2006, pour mener des recherches sur ces grottes, la Société *Peñoles*, propriétaire de la mine, la Société de production audiovisuelle mexicaine *C/Producciones* et l'Association italienne d'exploration géographique

La Venta ont mis sur pied le Projet Naica. La première action a été d'organiser un suivi médical en temps réel des explorateurs et des chercheurs. Nous nous sommes attachés ensuite à mettre au point des combinaisons et des respirateurs spéciaux pour permettre un séjour prolongé à l'intérieur de la grotte.

L'ESSENTIEL

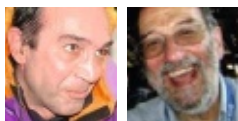
✓ En 2000, dans la mine de Naica, au Mexique, trois grottes abritant des cristaux de gypse géants ont été mises au jour. L'une contient des cristaux allant jusqu'à 11 mètres, sans doute les plus grands du monde.

✓ L'humidité et la température extrêmes qui y règnent rendent l'exploration de ces grottes difficile.

✓ Plusieurs expéditions ont cependant permis d'étudier ces cristaux géants.

✓ Ils seront engloutis à brève échéance par la remontée des eaux si rien n'est fait.

LES AUTEURS



Giovanni BADINO est professeur de physique à l'Université de Turin, en Italie.

Paolo FORTI est professeur de spéléologie à l'Université de Bologne.

1. LES CRISTAUX DE GYPSE

de la Grotte aux cristaux. Ils sont moins nombreux sur le plafond de la grotte que sur le sol. Cette répartition serait due à une stratification de la concentration en sulfate de calcium des eaux qui inondaient la grotte, la probabilité que la croissance d'un cristal soit initiée augmentant alors avec la profondeur.

Le Projet Naica rassemble des spécialistes de plusieurs disciplines. Les scientifiques qui en font partie sont issus d'une vingtaine d'Universités et organismes de recherche de par le monde. La coordination scientifique a été confiée au Département des sciences de la Terre et de l'environnement de l'Université de Bologne, en Italie. L'objectif du Projet était triple. Tout d'abord, explorer les cavités naturelles rencontrées par les galeries de la mine : entre 2006 et 2010, ce travail a été mené à bien, avec entre autres l'exécution d'un relevé précis de la Grotte aux cristaux et des cristaux eux-mêmes. Un autre aspect du Projet était la documentation de ces environnements incroyables : cet objectif a été atteint en 2010, avec la réalisation d'un documentaire scientifique et d'un film d'exploration, et des milliers de clichés haute résolution. L'étude scientifique de ces grottes est pour sa part toujours en cours.

Quand et comment se sont développés les cristaux de gypse géants ? Combien de temps a demandé leur croissance ?

Que vont-ils devenir ? Telles sont les principales questions auxquelles nous allons tenter de répondre.

Des conditions extrêmement stables

Les cristaux géants sont formés de gypse, c'est-à-dire du sulfate dihydraté de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). D'où provient-il ? Durant des milliers d'années, l'acide sulfurique formé par l'oxydation de sulfides sous-jacents a réagi avec les roches sédimentaires (carbonate de calcium) pour former des eaux riches en sulfate de calcium (CaSO_4). Ce dernier précipite en général sous forme d'anhydrite. De fait, cette roche est massivement présente sur le site de Naica en dessous de 240 mètres de profondeur. Sous certaines conditions, les eaux riches en sulfate de calcium peuvent aussi précipiter sous forme de cristaux de gypse.

La présence de cristaux de gypse dans les grottes de Naica n'est ainsi pas étonnante. En revanche, leur gigantisme, mais aussi leur petit nombre, l'est plus. Pour





2. LES « VOILES » DE LA GROTTA AUX VOILES (à droite) sont de très fines fibres de gypse qui se sont développées par capillarité. D'autres espèces minérales se sont récemment formées dans les grottes depuis que l'eau s'est retirée il y a une trentaine d'années (ci-dessus, à 150 mètres de profondeur).



arriver à un tel résultat, la cristallisation a dû se dérouler de façon lente, mais continue, à partir d'une eau pas trop saturée en gypse. Une température et une composition chimique stables pendant des milliers d'années ont donc été nécessaires. Des variations de l'une ou l'autre auraient en effet conduit à la multiplication des départs de croissance des cristaux (ou nucléation), et donc à des cristaux plus nombreux et plus petits.

La stabilité thermique a été assurée par le grand aquifère thermal, dénué de point de déversement vers l'extérieur. Ainsi, la température des eaux qui baignaient les grottes est restée quasi constante : les mesures isotopiques ont indiqué qu'en plus de 250 000 ans, la température a varié entre 58 et 54 °C. Ce n'est qu'en 1980, lorsque le niveau de la nappe phréatique a baissé à cause du pompage au point d'assécher les grottes, que la température s'est mise à baisser.

Or ces températures sont juste sous le point d'équilibre, à 59 °C, où la solubilité du gypse est égale à celle de l'anhydrite. En d'autres termes, aux températures régnant dans les grottes de Naica, l'anhydrite dissous dans l'eau le reste, tandis que le gypse précipite. Mais étant donné la très petite différence de solubilité, la

Un cristal record

✓ **Presque tous les cristaux de la Grotte aux cristaux (162) ont été mesurés. Leur orientation dominante pointe vers le centre de la salle, à l'instar des géodes classiques, et leur longueur caractéristique se situe entre quatre et six mètres, ce qui est aussi la hauteur moyenne de la cavité. L'épaisseur est liée à la durée du dépôt, et sa distribution présente donc elle aussi une certaine uniformité : la plupart des cristaux sont épais de 30 à 60 centimètres, et quelques-uns seulement dépassent le mètre.**

Le plus grand cristal (sans doute le plus grand cristal libre au monde) s'est formé presque à l'horizontale dans le Nord-Est de la grotte. Il mesure 11,40 mètres, avec une section de base de 80 centimètres sur 90 et une section terminale de 30 centimètres sur 35. Son volume est d'environ cinq mètres cubes. Nous l'avons nommé « Cristal Cin ».

saturation de l'eau en gypse est très faible, de sorte que peu de cristaux se forment. La cristallisation se concentrant sur un petit nombre de sites de nucléations, ils sont devenus gigantesques.

Pour estimer avec précision la durée nécessaire pour que les cristaux atteignent leurs dimensions actuelles, deux méthodes distinctes ont été utilisées. La première s'appuie sur le rapport entre les isotopes d'uranium et de thorium (U/Th), une méthode bien éprouvée. Les experts ont daté des échantillons recueillis à diverses profondeurs dans les cristaux, et ont estimé entre 200 000 et 300 000 ans l'âge des plus grands cristaux. Par la suite, nous avons affiné cette datation en mesurant la vitesse actuelle de dépôt du gypse par les eaux thermales qui circulent encore quelque 300 mètres plus bas. Pour ce faire, nous avons reproduit les conditions dans lesquelles les cristaux se sont développés. Des tablettes de gypse destinées à favoriser la croissance cristalline ont été déposées dans un instrument placé sous une sortie d'eau thermale à 590 mètres de fond, dans un environnement saturé en humidité et à une température supérieure à 51 °C.

Au bout de six mois, des petits cristaux de gypse s'étaient déjà développés,

similaires aux gigantesques cristaux naturels. Les mesures ont continué pendant plus de trois ans. L'extrapolation du rythme de croissance donné par cette expérience a indiqué un âge de 250 000 ans pour les plus grands cristaux, en accord avec la datation radio-isotopique. Cette mesure est néanmoins à prendre avec prudence, car la croissance dépend de facteurs inconnus tels que les variations du débit de l'eau et la concentration initiale des solutés.

DÈS LE MOMENT OÙ L'ON ARRÊTERA LES POMPES, l'eau de l'aquifère remontera à son niveau d'origine, 160 mètres au-dessus de la Grotte aux cristaux.

Les grottes de Naica sont célèbres pour leurs cristaux géants, mais elles renferment d'autres cristaux de gypse beaucoup plus petits qui, bien que peu spectaculaires, revêtent un grand intérêt tant esthétique que scientifique. Parmi eux, citons les « voiles », formations délicates uniques au monde : de très fines fibres de gypse qui se sont développées en quelques jours par capillarité à partir du moment où l'eau chaude quittait les grottes, il y a moins de 20 ans. Ou encore les « crochets de gypse », des formes effilées et tordues, qui doivent leur évolution aux phénomènes de condensation rapide qui se sont manifestés lorsque l'eau a abandonné les grottes.

Mais ces grottes, même si elles sont tapissées de cristaux de gypse, abritent aussi une grande variété de minéraux. Oxydes, hydroxydes, sulfates, silicates de phosphates, chlorures... À l'heure actuelle, on en a découvert plus de 40 espèces. Certains de ces minéraux, pour l'essentiel des dépôts d'oxyhydroxydes de fer, manganèse, plomb et zinc, s'étaient déjà formés avant que les grands cristaux de gypse ne se forment, et ils ont continué à grandir même pendant leur croissance, engendrant de nombreuses inclusions solides à l'intérieur de ceux-ci.

Toutefois, les minéraux autres que le gypse se sont principalement développés après que l'eau a quitté les grottes sous l'effet du pompage. En effet, plus de la moitié des minéraux secondaires observés se sont formés au cours des 30 dernières années.

Même si à l'œil nu, les cristaux de gypse de Naica semblent purs et parfaits, au

microscope, on observe de nombreuses petites cavités, qui contiennent parfois des substances solides ou liquides. Ces inclusions, fréquentes dans les cristaux, sont très utiles, car elles apportent de nombreuses informations sur l'environnement au moment où les parties concernées des cristaux étaient en formation.

Dans les gypses de Naica, les inclusions liquides sont fréquentes et souvent de dimensions inhabituelles. Dans de nombreux cas, elles sont aussi biphasiques (eau et gaz cohabitent). Leur étude statistique a permis de définir la salinité et la température de l'eau au moment où se produisait le dépôt et donc de reconstituer la composition chimique des eaux thermales pendant toute la période de croissance des cristaux.

Des pollens assez bien conservés ont également été extraits des cristaux de Naica. C'est presque incroyable, car l'eau dans laquelle se sont formés les cristaux doit voyager sous terre sur plusieurs dizaines de kilomètres et plonger à plus de 1 000 mètres de profondeur avant de remonter et d'atteindre les grottes de Naica. Jusqu'à présent, 60 échantillons de pollens ont été prélevés et identifiés. La présence de diverses espèces a permis de déterminer le climat de Naica il y a des dizaines de milliers d'années, alors que l'homme n'était pas encore arrivé dans ces régions du Mexique. Le climat n'était alors pas désertique comme aujourd'hui, mais beaucoup plus humide et frais, semblable au climat actuel de San Francisco, 1 500 kilomètres plus au Nord.

Une série plus vaste de grottes

Par ailleurs, de nombreuses inclusions solides dans les cristaux de gypse sont manifestement des structures biologiques fossilisées, à l'intérieur desquelles ne restait toutefois aucune trace de matériaux organiques.

Les travaux miniers qui ont conduit à la découverte de cet incroyable trésor géologique ont modifié les conditions dans les grottes, les rendant presque visitables, mais bien différentes de l'environnement naturel initial. L'étude de l'évolution de la température et de l'humidité des grottes est donc intéressante pour analyser leur transition vers un nouvel état, et éventuellement limiter les dégâts dus à des changements trop brusques tout en rendant les



3. LA COMBINAISON DE SURVIE TOLOMEA.

Dans les conditions qui règnent dans les grottes de Naica, le corps ne peut pas se réguler thermiquement, ce qui peut entraîner la mort en une dizaine de minutes. La combinaison tolomea a été mise au point pour permettre des séjours de plus d'une heure. Elle se compose d'une couche externe, isolante, et d'une couche centrale qui contient de la glace. En fondant, celle-ci absorbe la chaleur du corps et de l'environnement. Un respirateur qui déshumidifie et refroidit l'air empêche la condensation de la vapeur dans les poumons. L'air frais excédentaire est envoyé directement sur les yeux.

grottes plus accessibles aux visiteurs et aux recherches.

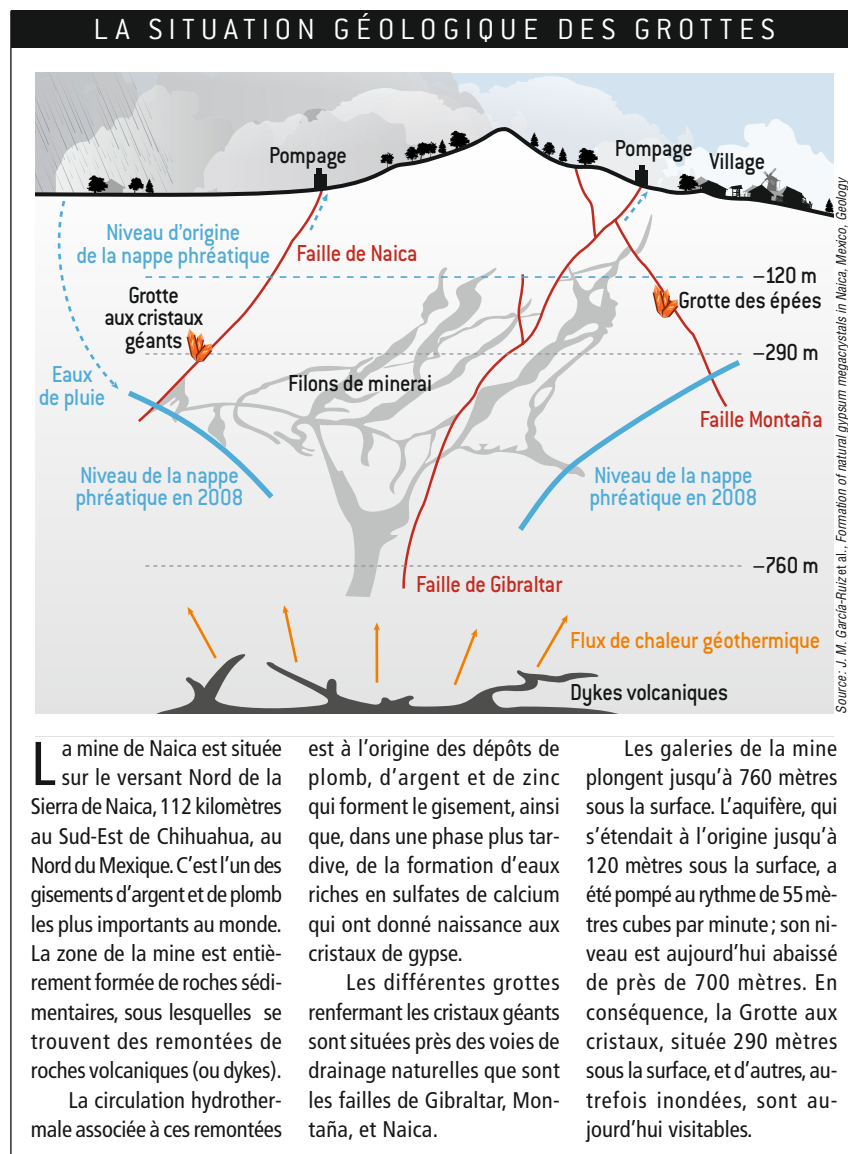
Nous avons ainsi découvert que la Grotte aux cristaux se refroidit de 0,52 degré par an en raison du contact avec la mine *via* le couloir d'accès et, à travers la roche, avec des galeries passant non loin à l'Ouest. Un très faible courant d'air qui traverse la grotte montre qu'il existe une communication avec des zones plus basses de la mine. L'étude des réactions de la grotte à de brusques variations thermiques et de l'évolution des fluctuations de température et d'humidité en fonction de la profondeur a révélé un résultat fascinant : la Grotte aux cristaux serait seulement un petit élément visible d'une série plus vaste qui s'étend au-dessus, comprenant notamment la grotte de l'Œil de la reine (*Ojo de la Reina*). L'un des objectifs des recherches futures sera d'explorer ces cavités.

Quel avenir ?

Pour diverses raisons, les grottes de Naica ne pourront pas rester intactes très longtemps. Avant toute chose, elles sont sous la menace constante de déprédations. La valeur commerciale des grands cristaux est telle que les mineurs tentent d'en extraire pour les vendre sur le marché international des minéraux. La compagnie propriétaire de la mine fait de son mieux pour empêcher les pillages, mais ils ne peuvent être totalement évités.

Le refroidissement constant et assez rapide des grottes constitue une menace encore plus grande. La chute progressive de la température externe des cristaux, qui a commencé il y a un peu moins de 30 ans, a depuis peu déclenché un phénomène de condensation de la vapeur d'eau, avec de graves conséquences. L'eau qui se condense redissout partiellement les cristaux en surface, mais y forme aussi des concrétions de calcite, qui leur font perdre leur brillance et leur transparence.

Mais la grotte est avant tout condamnée par la fin des activités minières, qui surviendra sans doute d'ici quelques années, lorsque l'extraction de l'argent ne sera plus assez rentable. Dès le moment où l'on arrêtera les pompes, l'eau de l'aquifère remontera en quelques semaines jusqu'à son niveau d'origine, 160 mètres au-dessus de la Grotte aux cristaux (située à 290 mètres de profondeur). La grotte retrouvera alors les conditions environnementales qui ont présidé à la formation des cristaux, mais



La mine de Naica est située sur le versant Nord de la Sierra de Naica, 112 kilomètres au Sud-Est de Chihuahua, au Nord du Mexique. C'est l'un des gisements d'argent et de plomb les plus importants au monde. La zone de la mine est entièrement formée de roches sédimentaires, sous lesquelles se trouvent des remontées de roches volcaniques (ou dykes).

La circulation hydrothermale associée à ces remontées

est à l'origine des dépôts de plomb, d'argent et de zinc qui forment le gisement, ainsi que, dans une phase plus tardive, de la formation d'eaux riches en sulfates de calcium qui ont donné naissance aux cristaux de gypse.

Les différentes grottes renfermant les cristaux géants sont situées près des voies de drainage naturelles que sont les failles de Gibraltar, Montaña, et Naica.

Les galeries de la mine plongent jusqu'à 760 mètres sous la surface. L'aquifère, qui s'étendait à l'origine jusqu'à 120 mètres sous la surface, a été pompé au rythme de 55 mètres cubes par minute ; son niveau est aujourd'hui abaissé de près de 700 mètres. En conséquence, la Grotte aux cristaux, située 290 mètres sous la surface, et d'autres, autrefois inondées, sont aujourd'hui visitables.

la brève fenêtre temporelle qui s'était ouverte sur ces merveilles géologiques se refermera à jamais. Pour cette raison, les participants du Projet Naica tentent de mener à bien toutes les études scientifiques et les relevés d'un lieu qui disparaîtra tôt ou tard.

Nous aimerions cependant faire en sorte que ces merveilles naturelles restent visibles pour les générations futures même après que les eaux thermales seront remontées. Il s'agirait de déplacer la grotte, un peu comme le temple égyptien d'Abou-Simbel a été littéralement déplacé pour être sauvé de la remontée des eaux provoquée par le barrage d'Assouan. Du point de vue technique, le projet est réalisable, mais il nécessite une volonté politique. C'est là l'unique moyen de continuer à montrer les grottes de Naica et leurs incroyables « forêts de cristaux géants ».

✓ BIBLIOGRAPHIE

P. Forti, *Genesis and evolution of the caves in the Naica mine [Chihuahua, Mexico]*, *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 54, suppl. 2, p. 115-135, mai 2010.

P. Forti et L. Sanna, *The Naica project : a multidisciplinary study of the largest gypsum crystal of the world*, *Episodes*, vol. 33, n° 1, pp. 1-10, 2010.

J. M. García-Ruiz, R. Villasuso, C. Ayora, A. Canals et F. Otálora, *Formation of natural gypsum megacrystals in Naica, Mexico*, *Geology*, vol. 35 pp. 327-330, 2007. doi : 10.1130/G23393A.1.

Entre terre et mer : des zones à préserver

Les zones humides du littoral, sols gorgés d'eau, sont parmi les plus riches écosystèmes de la planète.

Leur protection est devenue un enjeu majeur pour le maintien de la biodiversité.

Fernand Verger

L'ESSENTIEL

✓ Le zones humides existent sous de multiples formes : estuaires, deltas, plaines alluviales, marais, étangs, tourbières, barrières de corail...

✓ Convoitées pour leur fertilité, elles sont drainées, asséchées et cultivées depuis des siècles.

✓ Leur disparition s'est accélérée au XX^e siècle avec l'urbanisation, l'industrialisation et l'agriculture intensive.

✓ Depuis 40 ans, on tente de les protéger tant pour la richesse de ces écosystèmes que pour leur valeur économique et sociale.

En 2010, la tempête Xynthia a envahi des zones humides du littoral vendéen. Des lotissements et un camping avaient été construits sur ces zones, que l'on avait tenté de soustraire aux marées au moyen de digues. Cette tempête aux conséquences tragiques a mis sur le devant de la scène la question de la gestion raisonnée des zones humides. Rien qu'en France, ce patrimoine naturel couvre plus de trois millions d'hectares, dont près de la moitié sur le littoral. Aujourd'hui, alors que leur disparition s'accélère, on mesure leur rôle dans l'équilibre écologique de la

planète. Pourquoi ces zones disparaissent-elles ? Quelles sont les conséquences de leur disparition sur les écosystèmes ? Quelles solutions sont mises en place ou envisagées pour les protéger ? Telles sont les questions que nous examinerons ici. Mais auparavant, précisons ce qu'est une zone humide.

C'est un domaine où l'eau est présente soit en profondeur dans les sols, soit en surface, et ce de façon permanente ou saisonnière. Une succession de définitions légales en ont été données à partir des années 1970, lorsqu'il s'est agi de les protéger, notamment aux États-Unis et en France. Parmi les

